

大型空间望远镜次镜背板的优化设计

程明星^{1,2}, 李威^{1,2}, 赵伟国¹, 赵海波¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心, 北京 100049)

摘要:针对2 m量级大型离轴三反空间相机,采用并联机构作为次镜的调整机构。并且将调整机构动平台直接作为次镜支撑背板使用,增加了结构刚度,同时也使整机结构更加紧凑。因此,背板是次镜组件的核心零件。背板的材料采用具有良好尺寸稳定性、比刚度高的60 SiC/Al。由于背板承上启下的重要性,决定了背板对自身重量及刚度有很高的要求,因此采用以刚度为目标对其进行拓扑优化设计,并且以背板质量和基频作为目标对背板面板与加强筋的尺寸进行多目标尺寸优化;最终优化后的背板质量为1.42 kg,基频达到954 Hz。最后对次镜组件进行静力学分析及动力学分析,结果表明:重力与4℃温升耦合工况下重力方向位移与面形RMS值最大;最大位移为9.651 μm,面形RMS值为7.535 nm;次镜组件约束状态下的一阶固有频率为115 Hz,满足大型空间望远镜在轨成像要求。

关键词:支撑背板;轻量化;拓扑优化;尺寸优化;有限元分析

中图分类号:V19;TP391.9 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.016

Optimal design of secondary mirror backplane for large space telescope

CHENG Ming-xing^{1,2}, LI Wei^{1,2}, ZHAO Wei-guo¹, ZHAO Hai-bo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences Materials and Optoelectronics Research Center, Beijing 100049, China)

Abstract: A parallel mechanism is used as the adjusting mechanism of the secondary mirror for a 2 m magnitude large off-axis three-mirror space camera. The moving platform of the adjusting mechanism is directly used as a secondary mirror support board, which increases the structural stiffness and makes the whole machine structure more compact. Therefore, the backplane is the core part of secondary mirror assembly. The backplane is made of 60SiC/Al with good dimensional stability and high specific stiffness. Due to the importance of the backplane as a top and bottom support, it has high requirements for its weight and stiffness, so the topology optimization design is carried out with the stiffness as the target, and the multi-objective size optimization of the backplane panel and a stiffener is carried out with the backplane quality and fundamental frequency as the target. The optimized backplane has a mass of 1.42 kg and a fundamental frequency of 954 Hz. Finally, statics and dynamics analysis of the secondary mirror module is carried out. The results show that the gravity direction displacement and surface RMS values are the largest under the coupling gravity and 4℃ temperature rise conditions; The maximum displacement is 9.651 μm and the RMS value of the surface is 7.535 nm. The first-order natural frequency in the constrained state of the secondary mirror assembly is 115 Hz, which meets the requirements for in-orbit imaging of large space telescopes.

Keywords: support backplane; lightweight; topology optimization; size optimization; finite element analysis

作者简介:程明星(1990-),男,硕士,主要研究方向为空间光学遥感器光机结构设计与分析。E-mail:692456712@qq.com

通讯作者:李威(1970-),男,博士研究生,研究员,主要研究方向为空间光学遥感器总体设计技术。E-mail:leew2006@ciomp.ac.cn

收稿日期:2021-12-31;修订日期:2022-03-11

1 引言

大型空间望远镜具有分辨率高、集光能力强、观测视场大等优点,可获取更多、更精确的天文资料,在航天领域得到了广泛的应用^[1]。空间望远镜发射时伴随冲击振动、以及入轨后环境温变、重力释放等影响,主、次镜相对位置发生变化对相机的成像性能影响很大,因此设置调整机构对望远镜系统进行修正^[2]。相对于调整主镜而言,调整次镜需要的功耗更小、效率更高,因此国内外很多空间望远镜采用并联机构对次镜进行调整^[3]。

次镜支撑背板是次镜的承载结构,为次镜提供承载接口,保证次镜的空间位置精度。同时背板也是次镜调整机构的动平台,是调整机构运动的终端,起到承上启下的作用,是整个次镜组件的核心零件。其重量影响次镜在重力方向的位移,使次镜光轴产生偏移,进而影响成像质量;同时次镜支撑背板的重量过低,则自身刚度不足,影响次镜的面形精度。因此次镜支撑背板的优化设计对空间相机光学系统性能具有十分重要的意义^[4]。

表1 常用航天材料性能参数

Tab. 1 Performance parameters of common aerospace materials

Material	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	$\alpha/^{\circ}C$	$\lambda/mW \cdot (mm \cdot ^{\circ}C)^{-1}$	μ	$(E/\rho) \times (\lambda/\alpha)$
M40J	1.56	145	Designable	Designable	0.3	Designable
60 SiC/Al	2.94	213	8.0×10^{-6}	230	0.23	2082.9
TC4	4.44	109	8.9×10^{-6}	6.8	0.34	18.7
4J32	8.1	141	0.65×10^{-6}	13.9	0.25	372.3
LC4	2.85	68	21.4×10^{-6}	155	0.33	172.8

3 背板结构设计

3.1 设计要求

为了使次镜组件结构紧凑,减少重量,将次镜调整机构(并联机构)动平台直接作为次镜支撑背板,如图1所示。次镜采用三点支撑,且支撑点关于重力方向(X轴)呈对称分布。为满足轻量化及便于装调的要求,设计支撑背板中心孔为100mm,并将背板设计为8边形结构,如图2所示。此外次镜背板应具有足够的刚度、热稳定性及合理的动态刚度,以减小对光学成像的影响及避免发生共振现象^[6]。

3.2 背板拓扑优化设计

拓扑优化的目的在于保证次镜支撑背板足够刚度的条件下,得到次镜支撑背板材料的最合理分布

本文以2 m量级大口径离轴三反空间望远镜为背景,综合考虑刚度、质量体积等次镜组件设计要求,对次镜支撑背板进行了结构优化设计。采用60 SiC/Al作为次镜支撑背板材料,并且针对次镜背板进行了拓扑优化设计及尺寸优化设计,得到轻量化和力学性能均优的次镜背板结构。最后利用有限元分析方法对次镜组件进行力学分析,以次镜面形RMS值和次镜组件基频作为衡量指标,检验设计的合理性。

2 背板材料选取

大型空间望远镜在发射及入轨后经历较为严苛的力热环境,次镜支撑结构需要更高的承载能力,因此背板材料的选取非常重要,目前空间望远镜结构材料向质量轻、高刚度、良好的尺寸稳定性等方向发展^[5]。常用的支撑结构材料有殷钢、铝合金、钛合金、60 SiC/Al等,表1列出了常用空间结构材料的详细参数。由于60 SiC/Al具有高比刚度、高比模量、抗疲劳性能好及减振性能好等优点,因此选用60 SiC/Al作为次镜支撑背板的材料。

形式。根据次镜组件的装配关系设计出背板的初步结构,并建立出有限元模型及边界条件,如图3所示。

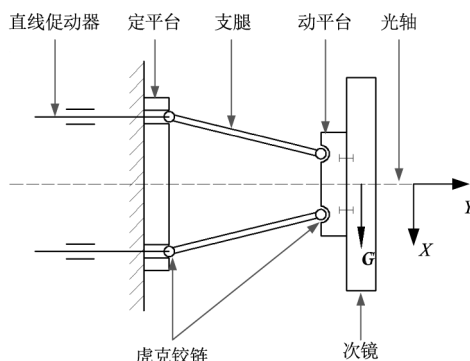


图1 次镜调整机构简图

Fig. 1 Schematic diagram of secondary mirror adjustment mechanism

将次镜向其质心简化为质量点单元(CONM2)并利用 RBE2 单元将质量点连接在图 2 中的次镜柔节接口处,约束调整机构支腿接口 12 个孔的全部自由度。背板有限元模型全部为 2D 单元,图 3 设计区域经拓扑优化后最终保留的部分即支撑背板加强筋的布置形式。

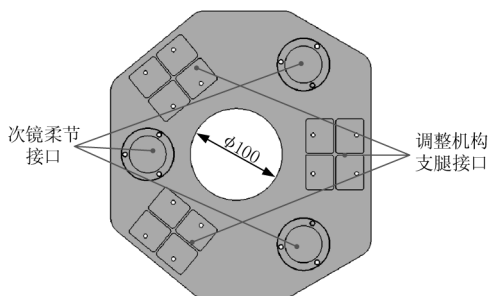


图 2 背板及其他构件接口

Fig. 2 Interface of backplane and other components

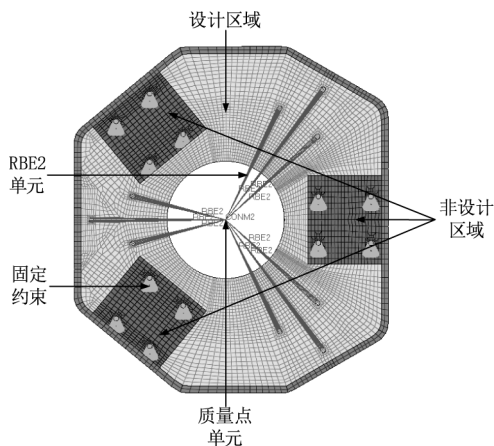


图 3 背板初始结构有限元模型

Fig. 3 Finite element model of initial structure of backplane

采用基于变密度法的拓扑优化方法对次镜背板进行拓扑优化设计^[7],从而引入 SIMP 数学模型,以结构刚度最大为目标,每个单元的单元密度(单元密度与材料弹性模量具有某种函数关系)为变量,以体积比为约束,优化模型为:

$$\max(\text{Frequency}), \text{ s. t. } V(\rho)/V_0 \leq f, 0 \leq \rho_i \leq 1$$

式中, V_0 为初始结构体积; V 为优化结构的体积; f 为体积比; ρ_i 为单元相对密度, $0 \leq \rho_i \leq 1$ 。

建立好有限元模型后应用 Optistruct 软件进行拓扑优化分析,同时为了保证刚度的对称性,将拓扑优化结果设定为对称形式,经过 22 次迭代得到优化结果,如图 4、5 所示。通过拓扑优化结果可以得到支撑背板加强筋的布置形式,同时背板需要保留一定厚度的面板,最终设计出背板结构,如图 8 所示。

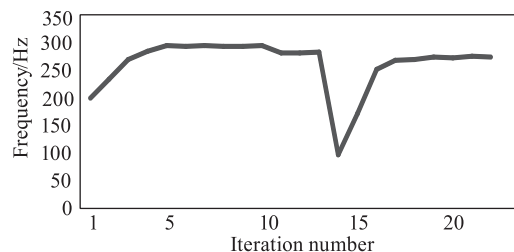


图 4 迭代收敛曲线

Fig. 4 Iterative convergence curve

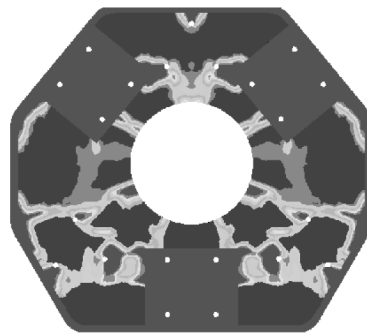


图 5 背板拓扑优化结果

Fig. 5 Topology optimization results of the backplane

3.3 DOE 实验分析

次镜支撑背板经过拓扑优化设计,其结构设计基本完成,但加强筋及背板面板厚度对自身刚度及重量仍有很大影响,为了使其重量与刚度均达到最佳,还需要对加强筋及面板厚度尺寸进行尺寸优化设计。尺寸优化设计的目标可以有多种选择,一方面背板加强筋及面板厚度尺寸与其自身刚度和重量有直接关系,背板刚度又影响次镜面形精度。此外,次镜背板重量还影响次镜在重力方向位移,使次镜光轴产生偏移,进而影响成像质量。因此背板重量、刚度及面形都可以作为尺寸优化的目标。

尺寸优化目标的选择对背板加强筋及面板厚度尺寸能否达到最佳有直接影响。有著作将次镜面形 RMS 值作为优化目标得出背板加强筋及面板厚度^[8]。但本课题从定性分析角度可知背板加强筋及面板厚度尺寸对次镜面形影响很小,因此针对背板加强筋及面板厚度尺寸对次镜面形影响进行 DOE 实验分析,以验证本课题用次镜面形作为尺寸优化目标的合理性。有限元模型如图 6 所示,将背板加强筋及面板厚度尺寸作为变量,面形 RMS 值最小作为目标,约束背板与调整机构支腿连接接口,将变量进行排列组合并取 100 个样本点,利用 Isight 软件集成 Hypermesh、Optistruct 及 Sigfit 并采用拉丁超立方实验设计方法来确定背板加强筋及面板尺寸

对面形的影响。最终分析结果如图 7 所示,由实验结果可知随着加强筋的尺寸变化,次镜组件在自身重力工况下次镜面形 RMS 值在 3.195 nm 与 3.329 nm 之间变动,可见背板加强筋及面板厚度尺寸对次镜面形的影响很小。并且由图可知,无论尺寸在给定范围内如何变化,次镜面形都远小于 $\lambda/50$ (λ 取 632.8 nm)。因此将次镜面形作为本课题的尺寸优化目标是不合理的,故将次镜支撑背板刚度最大及自身重量最小设计为尺寸优化的目标。

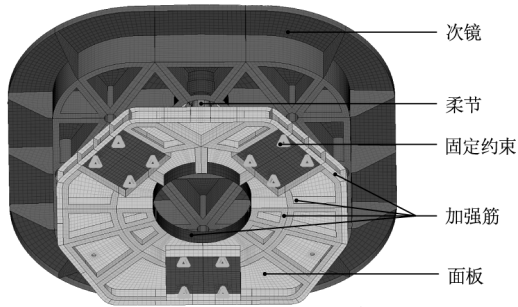


图 6 DOE 分析有限元模型

Fig.6 Finite element model of DOE analysis

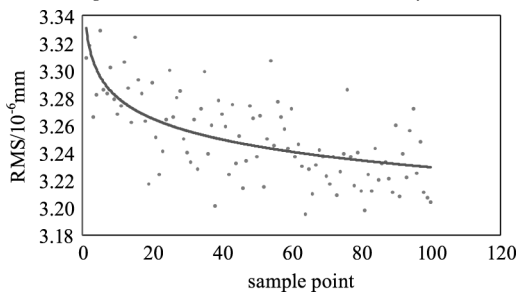


图 7 背板加强筋及面板尺寸对面形影响

Fig.7 Effect of backplane stiffeners and panel sizes on face shape

3.4 背板尺寸优化设计

次镜支撑背板面板及加强筋厚度参量如图 8 所示。将 $X_1, \dots, X_6$ 作为优化设计变量,以背板基频最大及质量最小为目标函数,约束背板与调整机构支腿接口处的 12 个孔。利用 Isight 优化软件中存档微遗传算法 (AMGA) 计算最佳优化尺寸,如图 9 所示。相对于 NSGA、NSGA-II 等优化算法而言,AMGA 算法虽然效率较低,但是 Pareto 解更加均匀和连续^[9]。优化模型的数学表达式为:

$X = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$, $\min(\text{Mass})$, $\max(\text{Frequency})$,

$$\text{s. t.} \begin{cases} 3 < X_1 < 5 \\ 4 < X_2 < 6 \\ 3 < X_3 < 5 \\ 3 < X_4 < 5 \\ 2 < X_5 < 3 \\ 3 < X_6 < 5 \end{cases}$$

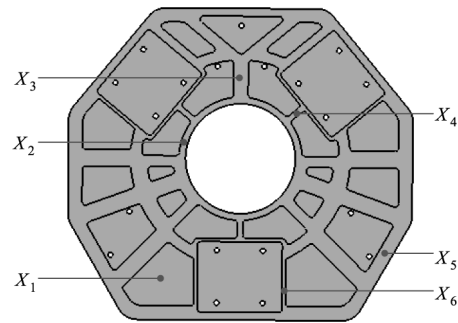


图 8 尺寸优化变量

Fig.8 Dimension optimization variables

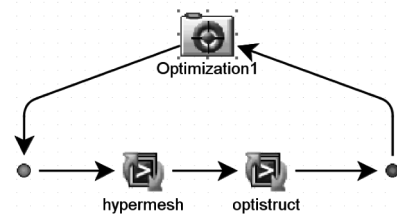


图 9 Isight 集成 Hypermesh 及 Optistruct 流程图

Fig.9 Isight integrated Hypermesh and Optistruct flow chart

经过优化计算,最终得到 Pareto 解集,如图 10 所示。表 2 列出各参量尺寸最佳的一组解。最终将面板厚度及加强筋厚度尺寸修改为表 2 中的尺寸,同时为满足工艺要求,将加强筋相交处设计 3 mm 的工艺圆角,整个背板结构设计完毕,设计结果如图 11 所示。经过拓扑优化与尺寸优化设计后,背板的质量由最初的 5.66 kg 轻量化到 1.42 kg,减少 75 % 的质量,背板基频达到 954 Hz。达到了质量与刚度均优的目的。

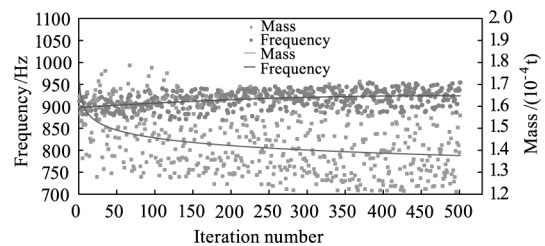


图 10 尺寸优化 Pareto 解集

Fig.10 Pareto solution set for size optimization

表 2 设计变量与优化结果

Tab.2 Design variables and optimization results

Variable	Range/mm	Initial value/mm	Optimization result/mm
X_1	[3,5]	3	3
X_2	[4,6]	5	6
X_3	[3,5]	3	4.9
X_4	[3,5]	3	5
X_5	[2,3]	2.5	2
X_6	[3,5]	3	5

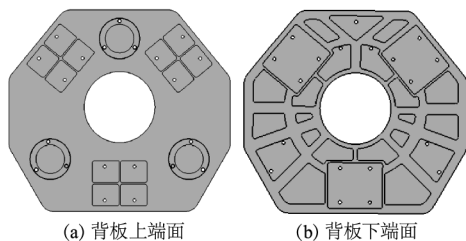


图 11 背板结构

Fig. 11 Backplane structure

4 有限元分析

次镜支撑背板要求具有优异的力学性能,保证望远镜在运输过程、发射过程及在轨工作过程中抵抗扰动^[10]。因此需要对次镜支撑背板进行静力学分析和动力学分析。在约束背板螺栓孔的情况下,分析次镜组件的低阶频率及其分别在重力和温升载荷作用下次镜的面形变化。利用 Zernike 多项式拟合次镜面形并得到次镜面形 RMS 值,判断载荷作用对成像质量的影响^[11]。

4.1 次镜组件的静力学分析

由于次镜实际工作状态下 X 方向保持为重力方向,因此该方向作为主要考察方向。次镜组件结构静力学分析分别对三种工况分析次镜重力方向位移及面形 RMS 值:(1)光轴水平,次镜组件在自身 X 向重力($G_X = 1g$)工况下,分析次镜在重力方向的位移及面形;(2) $\pm 4\text{ }^\circ\text{C}$ (参考温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$)温升载荷工况下,分析次镜面形 RMS 值;(3)上述两种工况耦合情况下,分析次镜面形 RMS 值。

建立有限元模型,创建载荷与边界条件,约束调整机构与设施接口的全部自由度,如图 12 所示。分析得到次镜组件在三种工况下镜面变形及面形 RMS 值,如表 3 所示。图 13 为耦合工况下次镜镜面变形及面形云图。

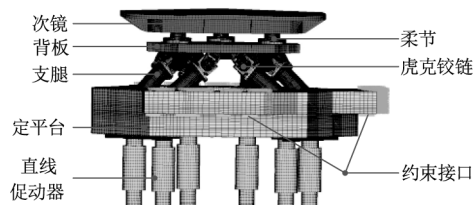


图 12 次镜组件有限元模型

Fig. 12 Finite element model of secondary mirror component

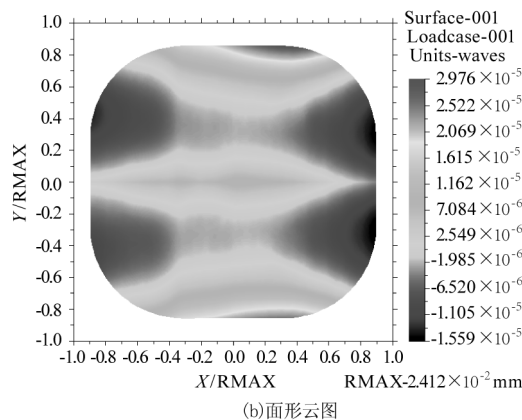
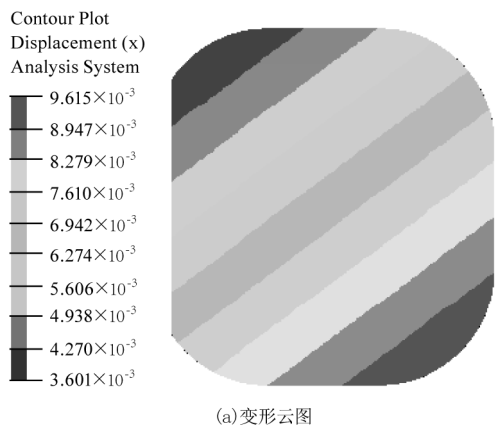


图 13 耦合工况下次镜镜面变形及面形云图

Fig. 13 Mirror deformation and surface shape cloud of the next mirror under coupling conditions

表 3 不同载荷下次镜变形及面形

Tab. 3 Secondary mirror deformation and surface shape under different loads

Load	Displacement/ μm	RMS/ nm
G_X	9.063	3.266
$24\text{ }^\circ\text{C}$	4.991	5.237
$G_X + 24\text{ }^\circ\text{C}$	9.651	7.535

由表 3 可知,重力与温升耦合工况下的面形最大为 7.535 nm ,小于 $\lambda/50$ (λ 取 632.8 nm)。说明次镜组件各零件热膨胀系数相匹配,具有良好的热稳定性,同时次镜在耦合工况下 X 向最大位移为 $9.651\text{ }\mu\text{m}$,小于 0.02 mm 的设计指标,说明次镜组件具有良好的静态支撑刚度。

4.2 次镜组件的动力学分析

动力学分析的主要目的是获取次镜组件的动态特性,即系统的固有频率、振型等,使次镜组件在严酷力学环境下保证良好的动态特性^[12]。

动力学主要分析在约束定平台与设施接口全部

自由度的条件下次镜组件结构的低阶模态,验证次镜支撑背板是否能发生共振现象。表 4 列出了空间相机次镜组件有约束情况下的前三阶模态。可知其一阶固有频率为 115 Hz,高于系统要求 (>100 Hz),其相应的振型如图 14 所示。说明次镜组件的动态刚度满足设计要求。

表 4 前三阶模态结果

Tab. 4 First three modal results

Order	Frequency/Hz	Formation
1	115	Swing around X axis
2	152	Swing around Z axis
3	164	Swing around Y axis

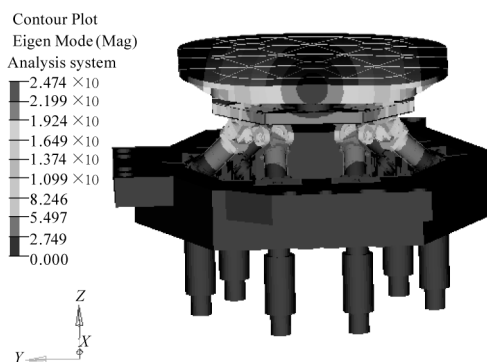


图 14 次镜组件的第一阶固有振型

Fig. 14 The first natural mode of the secondary mirror assembly

5 结 论

针对 2 m 量级离轴三反空间相机,次镜支撑背板作为次镜组件的核心零件,既承载次镜,又是次镜调整机构(并联机构)的动平台,向次镜输出运动。因此选择高比刚度、高比模量、抗疲劳性能好的 60 SiC/Al 作为背板的材料。建立了以刚度为目标的拓扑优化模型,得到支撑背板加强筋的布置方式。并利用 DOE 实验分析得出以背板重量及刚度为目标针对背板加强筋及面板厚度进行多目标尺寸优化设计。最终实现背板轻量化率与刚度均达到最佳的目的。最后,进行有限元分析验证设计的合理性。结果表明:次镜支撑背板优化设计后质量为 1.42 kg,轻量化率达到 75 %;次镜镜面在三种工况下重力方向位移最大为 $9.651 \mu\text{m}$;次镜面形 RMS 值最大为 7.535 nm ;次镜组件的第一阶固有频率为 115 Hz。以上数据表明所设计的次镜支撑背板结构满足设计要求,可以保证次镜组件的力学性能。所以采用文中设计方法可以为

其他类似结构提供设计参考。

参考文献:

- [1] Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. Opt. Precision Eng, 2008, 16(11): 2164–2172. (in Chinese)
韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2164–2172.
- [2] Qu Lixin. Environmental adaptive design of space mirror subassembly [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(5): 41–46. (in Chinese)
曲利新. 空间反射镜组件的环境适应性设计[J]. 光电工程, 2016, 43(5): 41–46.
- [3] Li Xianbin. Research on aberration sub-mirror correction technology of large aperture space remote sensor [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2020. (in Chinese)
李宪斌. 大口径空间遥感器失调波像差次镜校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [4] Zhang Lei, Ke Shanliang, Li Lin, et al. Multi-objective integrated optimization design of $\Phi 210$ mm ultra-thin and ultra-light SiC mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 89–97. (in Chinese)
张雷, 柯善良, 李林, 等. $\Phi 210$ mm 超薄超轻 SiC 反射镜多目标集成优化设计[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 89–97.
- [5] Li Weiyan, Lu Qunbo, Liu Yangyang, et al. Analysis and verification of thermal characteristics of main support structure of space camera based on low volume fraction SiC/Al main frame [J]. Acta Photonica Sinica, 201, 50(4): 215–225. (in Chinese)
李伟艳, 吕群波, 刘扬扬, 等. 基于低体分 SiC/Al 主镜框的空间相机主支撑结构热特性分析与验证[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 215–225.
- [6] Huang T. Research on ultra-lightweight technology of space off-axis camera reflector assembly [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
黄拓. 空间离轴相机反射镜组件超轻量化技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2020.
- [7] Ding Mao, Geng Da, Zhou Mindong, et al. Structural

- strength topology optimization strategy based on variable density method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 201, 55(6): 764 – 773. (in Chinese)
- 丁卯, 耿达, 周明东, 等. 基于变密度法的结构强度拓扑优化策略[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(6): 764 – 773.
- [8] Shao M Q. Research on Integrated Optimization Design method of Optomechanical Structure for Space Camera [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- 邵梦旗. 空间相机光机结构集成优化设计方法研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
- [9] Yuan X Y, Ma T B. Optimization design of honeycomb sandwich plate under hypervelocity impact[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 201, 42 (1): 179 – 184. (in Chinese)
- 袁小雅, 马天宝. 超高速碰撞下蜂窝夹层板结构优化设计研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (1): 179 – 184.
- [10] Zhou P W. Research on the robustness design and support key technology of space 2m primary mirror [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Cas, 2020. (in Chinese)
- 周平伟. 空间 2m 级主镜稳健性设计及支撑关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [11] Li L. Research on setting technology of off-axis reflection System based on Zernike Vector polynomial [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Cas, 2020. (in Chinese)
- 李蕾. 基于 Zernike 矢量多项式的离轴反射系统装调技术研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- [12] He D F, Xu R Z, Yang H. Structure design and finite element analysis of a mirror [J]. Application of Optoelectronic Technology, 2020, 35(4): 60 – 65. (in Chinese)
- 何德方, 徐荣泽, 杨浩. 一种反射镜的结构设计和有限元分析[J]. 光电技术应用, 2020, 35(4): 60 – 65.